

胡玥明, 闫欢欢, 张兴赢, 等, 2019. OMI-TOMS 与 OMI-DOAS 臭氧柱总量产品在中国地区的比较[J]. 气象, 45(3): 362-370.
Hu Y M, Yan H H, Zhang X Y, et al, 2019. Comparing OMI-TOMS and OMI-DOAS total ozone column in China[J]. Meteor Mon, 45(3): 362-370 (in Chinese).

OMI-TOMS 与 OMI-DOAS 臭氧柱总量产品 在中国地区的比较*

胡玥明¹ 闫欢欢² 张兴赢² 孟晓阳¹

¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081

² 国家卫星气象中心, 北京 100081

提 要: 臭氧是十分重要的痕量气体, 它具有活跃的化学反应特性和较强的辐射特性, 直接影响全球气候变化和人类的生活环境, 因此, 获得准确的臭氧柱浓度信息十分重要。搭载在 AURA 上的 OMI 探测仪可以测量大气中的臭氧含量, 其获得的臭氧产品有两种, 一个是基于 TOMS V8 算法反演得到的 OMI-TOMS 产品, 另一个是由 DOAS 算法得到的 OMI-DOAS 产品。本文首先分析了两种算法产品的统计特征, 结果表明两者具有较好的一致性; 其次, 分别分析了两种算法与像元位置的关系, 在不受行异常现象影响的像元处, 两种算法均不受像元位置的影响; 此外, 本文还研究了云和太阳天顶角对两种算法的影响, 有云时两者的差异更大, 云量在 70% 时两者的差异最大, 而且, 当有云存在时, 两者的偏差随着太阳天顶角的增加而增加。平流层 SO₂ 和吸收性气溶胶对两种算法没有显著影响。

关键词: OMI-TOMS V8, OMI-DOAS, 中国, 臭氧柱总量, 云, 太阳天顶角

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.03.006

Comparing OMI-TOMS and OMI-DOAS Total Ozone Column in China

HU Yueming¹ YAN Huanhuan² ZHANG Xingying² MENG Xiaoyang¹

¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Ozone is a significant trace gas in the atmosphere. It has both chemically and radiatively active characteristics, directly affecting global climate change and the Earth's environment. The OMI on board the AURA, uses both OMI-TOMS and OMI-DOAS algorithms to retrieve total ozone column (TOC). The purpose of this study is to produce a comparable result about the similarities and differences of the two algorithms in China. Firstly, this paper analyzes the statistical characteristics of the two algorithm products, and the results show that the two have good consistency. Secondly, the relationship between the two ozone products and the position of the pixel are analyzed separately. In the pixels that are not affected by the row-anomaly, both algorithms are not affected by the position of the pixel. In addition, the paper also studies the effects of cloud and solar zenith angle on the two algorithms. The difference between the two products is greater in cloudy pixels. When the cloud fraction is 70%, the difference reaches the largest amount. Moreover, the deviation increases with the increase of the solar zenith angle in cloudy conditions.

* 高分辨率对地观测系统重大专项应用共性关键技术项目(32-Y20A18-9001-15/17, 05-Y20A16-9001-15/17, 05-Y20A16-9001-15/17-3)、国家自然科学基金项目(41775028)和国家自然科学基金青年科学基金项目(41501413)共同资助

2018 年 1 月 18 日收稿; 2018 年 10 月 9 日收修定稿

第一作者: 胡玥明, 主要从事大气环境卫星遥感和对流层臭氧反演研究. Email: 297484308@qq.com

通信作者: 张兴赢, 主要从事卫星遥感及其在环境监测和气候变化领域的应用研究. Email: zxy@cma.gov.cn

Stratospheric SO₂ and absorbent aerosols have no significant effect on both algorithms.

Key words: OMI-TOMS V8 (ozone monitoring instrument-total ozone mapping spectrometer V8), OMI-DOAS (ozone monitoring instrument-differential optical absorption spectroscopy), China, total ozone column, cloud, solar zenith angle

引言

20世纪90年代以来,卫星遥感应用越来越广,几乎覆盖了环境保护的各个方面(张兴赢等,2007)。OMI探测仪(Ozone Monitoring Instrument)由荷兰与芬兰共同研制,搭载在美国国家航空航天局(NASA)于2004年1月发射的全球观测系统(EOS)卫星AURA上,用于测量大气痕量气体(如O₃、SO₂、NO₂等)的含量,也可以获得臭氧廓线、云及气溶胶等的信息(Vries et al,2002)。OMI采用天底观测方式,幅宽2600 km,可以对270~500 nm波段进行高光谱成像,并利用地球大气和地表的后向散射辐射反演大气中的痕量气体、气溶胶等产品,并且能够获得每日全球覆盖的高空间分辨率和谱分辨率数据。AURA是一颗太阳同步卫星,飞行高度约705 km,倾斜角约为98°,经过赤道升交点时间约为当地时间13:45。

OMI的臭氧柱总量产品有两种,分别是TOMS(OMI-Total Ozone Mapping Spectrometer)和DOAS(OMI-Differential Optical Absorption Spectroscopy),OMI-TOMS是以TOMS V8算法为基础并加以改进,OMI-DOAS算法由荷兰皇家气象研究院开发,用于OMI的臭氧反演。两种算法的比较和验证工作已经有一定的进展。在全球范围的验证中,Balis et al(2007)将两种卫星产品与地基仪器的观测数据进行比较,结果显示太阳天顶角及纬度变化对OMI-TOMS算法没有明显影响;Kroon et al(2008)通过对两种OMI产品的比较得出两者有较好的一致性但是在一些卫星参数和环境参数变化时两种算法的响应不同;在区域验证中,Buchard et al(2008)对法国两个城市的卫星数据和地基数据进行比较,Antón et al(2009)分析了伊比利亚半岛的OMI臭氧柱总量产品与地基数据的相关关系,均得出OMI反演的臭氧柱总量与地基观测值有较好的一致性,且两者的差异呈现出季节性变化的规律。中国地区的验证相对较少, Ma et al(2015)利用我国8个测站地基观测数据与OMI产品进行对比的

同时分析了太阳天顶角、观测方位角对两种算法的影响。本文通过对比中国区域OMI的两种卫星产品,进一步分析两者的差异以及造成差异的可能原因,并对其在中国地区的反演质量进行评估,分析的结果对两种卫星产品后续使用(如对流层,近地表臭氧含量的反演等)具有参考意义。

1 数据来源及处理

1.1 OMI-TOMS 产品简介

OMI-TOMS算法仅用两个波长反演臭氧柱总量,多数情况下采用317.5、331.2 nm两个波长,当观测区域处于高臭氧值或很大的太阳天顶角时则改用331.2、360 nm。中长波长对臭氧的吸收少,用来获得地表反照率;短波长对臭氧有强吸收,用来获得臭氧柱浓度(Bhartia and Wellemeyer,2002;江芳,2007)。OMI-TOMS算法利用其他波长对气溶胶、SO₂等进行订正(Livingston et al,2009;Huang et al,2017)。在计算臭氧柱总量的同时,该算法会根据331.2与360 nm辐射值的差来计算吸收性气溶胶指数,实现对基本算法的订正;SO₂在反演臭氧的波段有很强的吸收,算法利用OMI 305~310 nm波段获得SO₂的含量。

1.2 OMI-DOAS 产品简介

OMI-DOAS算法通过三步获得臭氧柱浓度:首先利用DOAS拟合获得臭氧斜柱浓度(slant column ozone,SCO);然后计算大气质量数(air mass factor,AMF),通过公式 $VCO = SCO/AMF$ 计算垂直柱浓度(vertical column ozone,VCO);最后对云进行订正。OMI-DOAS在中心波长为334.1 nm、宽为5 nm的窗口进行拟合,在这个过程中,拉曼散射和臭氧有效温度均被考虑在内。大气质量数的计算用到模式大气的垂直柱浓度,斜柱浓度则来自对OMI模拟光谱的DOAS拟合获得。云的信息对于获得准确的AMF以及云量订正因子十分重要,OMI-DOAS算法采用OMI O₂-O₂吸收带反演的云

产品。

1.3 数据处理

本文使用由 NASA (<https://mirador.gsfc.nasa.gov/>) 提供的 L2G_V003 (OMTO3G.003、OMDOAO3G.003) 和 L3_V003 (OMTO3e.003、OMDOA3e.003) 两种臭氧数据,两者都是全球每日臭氧柱浓度产品,数据格式为 HDF-EOS5,时间范围 2008—2011 年,为保证两种卫星产品在所选时间段内都能有相匹配的数据,每月选择 20—24 日共 5 d 的数据进行分析。L2G 数据是将 L2 数据放入 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的全球格点,并且包含 L2 数据反演臭氧总量所需要的云、气溶胶等参数,OMTO3G.003 的二级产品中包含气溶胶吸收系数;L3 数据则是从 L2 数据中选择最佳像素点放入 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的全球格点。

2 结果及讨论

2.1 OMI-TOMS 算法与 OMI-DOAS 算法在中国区域的比较

表 1 是 2008—2011 年 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 反演的臭氧柱总量产品在中国地区的相关性分析。从表中可见,两种产品的相关性有很明显的季节变化,冬季时相关性更高,夏季则相对较低,相关系数在 0.916(8 月)~0.995(1 月,12 月)间变化。均方根误差(RMSE)的计算公式为:

$$RMSE = \frac{100}{TOMS_{ave,month}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (TOMS_i - DOAS_i)^2}{N}} \% \quad (1)$$

式中, $TOMS_{ave,month}$ 是 OMI-TOMS 算法的月平均, $TOMS_i$ 、 $DOAS_i$ 分别为该月内 OMI-TOMS、OMI-DOAS 产品的臭氧柱浓度, N 为该月内两种算法匹配的格点数。RMSE 最大值出现在 7 月(2.96%),最小值出现在 12 月(1.86%),两者相关性较好。产生上述季节差异的原因有两点:一是两种算法中温度依赖性的差异以及各个波长的吸收截面会受温度的影响,二是云和太阳天顶角等物理参数的季节性变化。此外,表中还有平均偏差误差(MBE)和平均绝对偏差误差(MABE)两个参数,计算公式如下:

$$MBE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{TOMS_i - DOAS_i}{DOAS_i} \% \quad (2)$$

$$MABE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|TOMS_i - DOAS_i|}{DOAS_i} \% \quad (3)$$

式(2)和(3)中的缩写及字母含义与式(1)相同。由表 1 中可见,除 1、9、10 和 11 月外,MBE 均为正值,说明在中国地区,OMI-TOMS 算法的反演结果在多数月份高于 OMI-DOAS 算法,两种算法的差异很小,MABE 最大值为 2.24%(7 月)。图 1 为 2010 年 1 月(图 1a)和 7 月(图 1b)中国区域 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 臭氧柱总量的散点密度图。图中可见,冬季臭氧值的动态范围远大于夏季,而夏季的散点在 $y=x$ 线两侧分布的宽度范围更大,对其他年份的分析中也出现了相同的结果。冬季更大的臭氧

表 1 2008—2011 年中国区域 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 反演产品每月相关性分析

Table 1 2008—2011 OMI-TOMS/OMI-DOAS monthly correlation analysis

月份	N	REG	R	RMSE/%	MBE/%	MABE/%
1	234500	1.006	0.995	1.89405	-0.173217	1.4966
2	225167	1.027	0.994	1.99905	0.309968	1.5935
3	225147	1.037	0.992	2.26533	0.466359	1.80351
4	236761	1.018	0.987	2.35465	0.739798	1.84984
5	216961	1.018	0.9801	2.53139	0.513942	1.9492
6	231860	1.004	0.964	2.81671	0.389405	2.15109
7	225224	0.944	0.923	2.96251	0.0533864	2.23706
8	235665	0.927	0.916	2.77229	-0.237304	2.07226
9	228894	0.961	0.956	2.43127	-0.286056	1.85425
10	206221	0.953	0.972	2.08601	-0.103025	1.61321
11	221458	0.975	0.991	1.88322	0.453974	1.48624
12	218574	0.992	0.995	1.85689	0.101752	1.46446

注: N :两种算法中对应格点数据均有效的数据对个数,REG:两者的回归系数, R :两者的相关系数,RMSE:均方根误差,MBE:平均偏差误差,MABE:平均绝对偏差误差。

Note: N : number of the valid dataset of two algorithm, REG: regression coefficient, R : correlation coefficient, RMSE: root mean square error, MBE: mean bias error, MABE: mean absolute bias error.

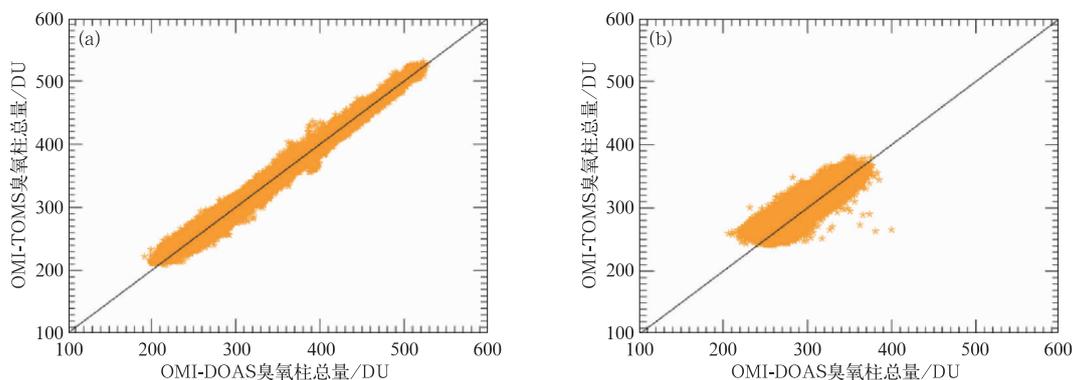


图 1 2010 年 1 月(a)和 7 月(b)中国区域 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 臭氧柱总量散点图

Fig. 1 Scatter diagrams of OMI-TOMS and OMI-DOAS total ozone column in China in January (a) and July (b) 2010

动态范围可以由两个动力过程来解释:不同气候臭氧混合比的区域间水平等熵对流输送及等熵面的垂直绝热移动(Koch et al, 2005; Wohltmann et al, 2005);夏季两种算法的差异更大,证实了前述结论。

图 2 是 2008—2011 年 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 算法反演的中国区域臭氧柱浓度的月平均结果。在中纬度地区,由于 DB 环流(Dobson-Brewer Circulation)等动力因素的影响,臭氧柱浓度是季节性变化的(Salby and Callaghan, 1993; 周秀骥等, 2004; Nikulin and Karpechko, 2005; Antón et al, 2007),图 2 中两个卫星产品均反映了这一特点,臭氧低值出现在夏季,高值出现在冬季,中国地区臭氧值每年在约 80 DU 的范围内浮动。两算法日平均差的绝对值在 0~5.3 DU。

图 3 是 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 臭氧柱浓

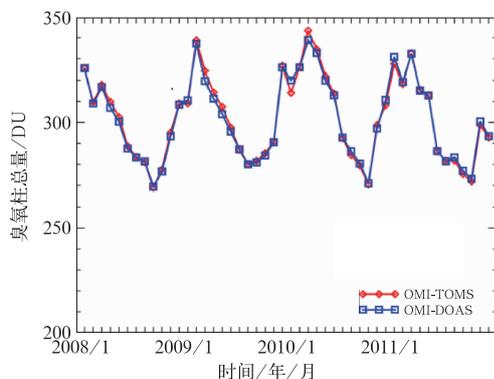


图 2 2008—2011 年中国区域 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 月平均臭氧柱总量

Fig. 2 Monthly averaged total ozone column of OMI-TOMS/OMI-DOAS in China in 2008—2011

度标准差,两种算法的标准差随时间有很大的浮动,但两者的变化趋势一致,即在相同的时间点两种算法偏离平均值的程度一致,这表明两种算法对于不同大气状态的变化响应十分相近。图 4 是两种算法

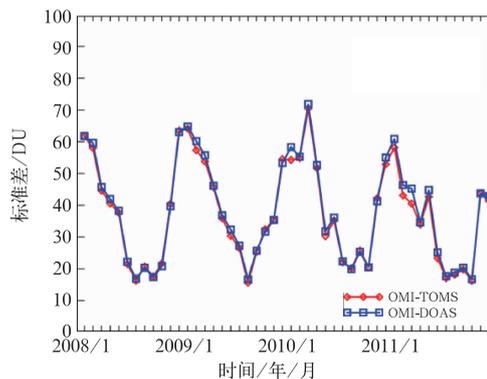


图 3 同图 2, 但为臭氧柱总量标准差

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for standard deviation of total ozone column

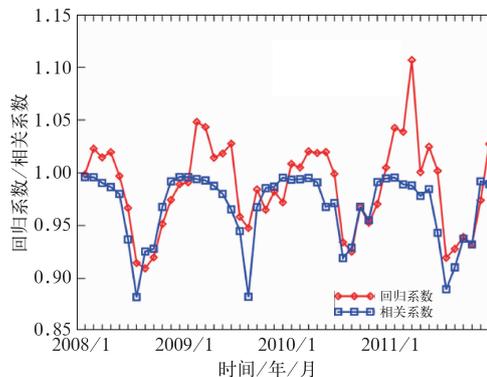


图 4 同图 2, 但为回归系数和相关系数

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for regression and correlation coefficients

反演臭氧柱总量的相关系数和回归系数,相关系数在 0.87~0.99,并且随时间变化,冬季相关性好,夏季相关性差,回归系数也有周期性变化的特征。

OMI 的观测方式是天底观测,幅宽为 2600 km,分为 60 个地面像元,其中第 29、30 是正对卫星的位置。所有的 OMI 产品是以像元为单位进行反演,但是由于幅宽较宽,每个像元处的太阳天顶角、太阳方位角、观测天顶角、观测方位角不同,导致各个像元位置的几何光学特性不同,在 OMI 的两个反演算法中并没有考虑像元间的差异,因此对每个像元上反演得到的臭氧柱总量进行分析也是十分必要的。本文分别研究了 2008—2011 年两种算法每个像元的臭氧总量及其偏离平均值的程度,结果显示,两种算法在某些像元处与平均值有较大的偏差。OMI 载荷的观测在 2007 年之后出现了行异常现象(Yan et al, 2012; Peng et al, 2016),本文将每个像元位置臭氧柱总量与所在幅宽平均值的偏差和对应像元出现行异常的次数进行比对,结果显示出现上述较大偏差的位置与行异常出现次数多的位置一致,因此,两种算法在不同像元上产生较大的差异可能是由于行异常现象引起的,而在没有受到行异常现象影响的像元位置,各个像元上的臭氧柱浓度值十分相近,即在不受行异常现象影响时,两种算法的反演结果与像元位置无关。

中国地域面积广大且地形地貌复杂,不同的地理位置及下垫面会影响两种算法的反演结果,地表反照率(如冰雪覆盖、植被)、云、太阳天顶角等因素随季节变化造成两种臭氧柱总量产品的差异在中国地区的空间分布具有随季节变化的特点(徐国强等, 2004; 施春华等, 2010),而且在中国,没有某一地区始终处于正值或负值。此外,在两者差异的空间分布图中有明显的条带特征,这是 OMI 仪器衰减造成的。

2.2 不同参数对两种算法的影响

2.2.1 云

云通过反射太阳辐射和阻止地球发射辐射,维持着全球能量平衡(卢乃锰等, 2017)。云对臭氧的反演会产生影响,主要体现在两个方面:一是云会散射太阳辐射,使大气层顶接收到的后向散射辐射增加,二是云的存在会遮挡云下臭氧,使臭氧吸收的辐射降低(肖辉等, 1999; 郑向东等, 2008)。两种算法对云的订正方法和采用的云产品不同,OMI-TOMS

算法的云压来自 OMI 拉曼散射反演的云产品,并利用臭氧弱吸收的波长基于混合朗伯体反照率模型(MLER)获得有效云量,计算出的云量 <0 时认为无云,云量 ≥ 1 时认为云覆盖了整个像元,无云和有云两种情况下直接利用等效朗伯体反照率模型(LER);对于 OMI-DOAS 算法,云下臭氧柱浓度的计算用到臭氧气候模式廓线,云压采用 OMI O_2-O_2 吸收带反演的结果。

图 5 是 2008 年中国地区 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 算法分别在有云($cf^{TOMS} > 0.5, cf^{DOAS} > 0.5$)和无云($cf^{TOMS} < 0.15, cf^{DOAS} = 0$)状态下两者相对偏差的折线图,相对偏差(relative difference, RD)由式(4)获得:

$$RD = \frac{TOMS_{ozone} - DOAS_{ozone}}{TOMS_{ozone}} \quad (4)$$

由图 5 可见,云存在时两者的偏差大,而且两者的偏差有明显的时间依赖性,每年的误差偏差在 2%~3% 变化,这种时间依赖性反映了云的季节性特征,这也是造成臭氧柱总量随时间规律性变化的原因之一。

图 6 是 2008 年 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 相对偏差随云量的变化,其中云量采用的是 OMI O_2-O_2 云产品反演的有效云量,从图中可以看到,当云量小于 30% 时两者的差异与云量的变化无关,云量在 30%~70% 时,两者的偏差随云量的增加而增加,云量为 70% 时偏差达到最大,之后随云量的增加两者的差异减少。这表明两种反演算法在有少量云覆盖和有大量云覆盖时反演结果的差异较小,中等云量

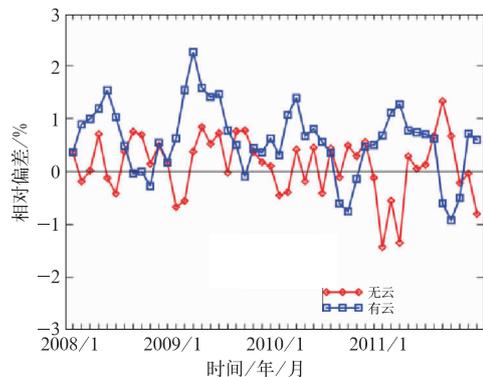


图 5 2008—2011 年中国地区 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 有云和无云状态时的相对偏差
Fig. 5 Relative deviation of OMI-TOMS and OMI-DOAS during different cloud conditions in China in 2008—2011

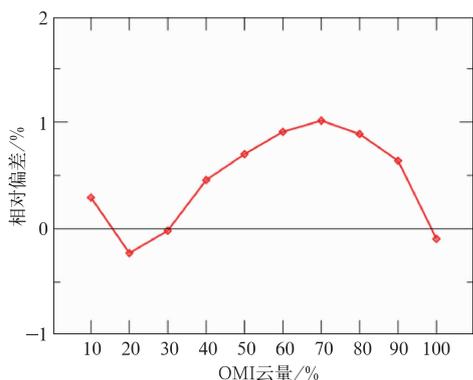


图 6 2008 年中国地区 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 相对偏差随 OMI 云量的变化
Fig. 6 Relative deviation of OMI-TOMS and OMI-DOAS with a function of OMI cloud fraction in China in 2008

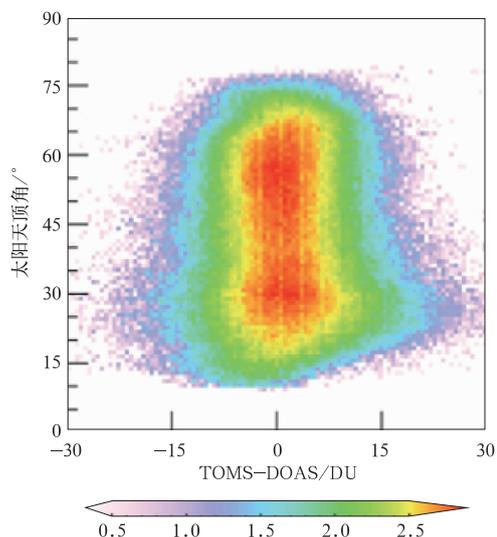


图 7 2008 年中国地区 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 的臭氧浓度差与太阳天顶角的散点密度图
[色标:对数色标,单位:lg(个)]

Fig. 7 Logarithmic (Base 10) scatter density plots of the solar zenith angle versus the difference between two OMI products (TOMS-DOAS) in China in 2008
[colorbar: logarithmic colorbar, unit: lg(number)]

时差异较大。

2.2.2 太阳天顶角

卫星反演的大气臭氧总量与实际大气臭氧总量和太阳天顶角有关(管成功和卞建春,2007),太阳天顶角会影响辐射测量值,在两种算法中,大气层顶的反照率是太阳天顶角的函数,而且在 OMI-DOAS 算法中,太阳天顶角对于 AMF 的计算也有影响,图 7 为 OMI-TOMS 与 OMI-DOAS 臭氧柱总量的差与太阳天顶角的散点密度图。由图可见,两种算法的结果与太阳天顶角的变化无关。值得注意的是当太阳天顶角在 35°~40°区间内,对应于差为 0 DU 附近的颜色比较浅,即在这个太阳角范围内两种算法得到的臭氧柱浓度差较大,在对 2009—2011 年数据做分析时也出现了同样的情况,出现这种结果可能是由 DOAS 算法中 AMF 的计算在这一天顶角范围内的误差较大造成的。

云的存在会影响两种算法反演结果的准确度,OMI-TOMS 算法在太阳天顶角小于 70°时不确定度在 2% 左右(Bhartia and Wellemeyer, 2002),OMI-DOAS 算法在有云时的不确定度为 3%,无云时为 2%(Veefkind et al, 2006)。图 8 是不同云量状态下 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 的偏差随太阳天顶角的变化,从图中可见,无云状态时两者的偏差和太阳天顶角无关,有云时两者的偏差随太阳天顶角的增大而增大。

2.2.3 平流层 SO₂

SO₂ 在 270~340 nm 有很强的吸收,该波段包含了 OMI 两种算法反演臭氧的波长。在某些波段

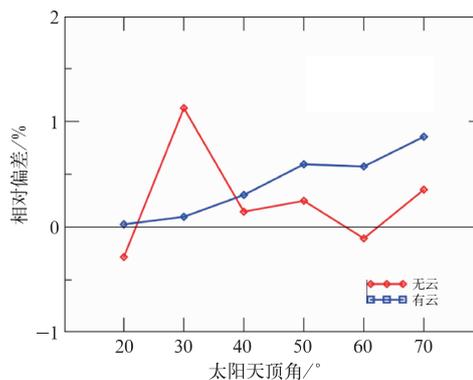


图 8 2008 年中国地区不同云量状态下 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 相对偏差随太阳天顶角的变化

Fig. 8 Evolution of the differences between two OMI products (TOMS-DOAS) with solar zenith angle for under cloud-free and cloud conditions in China in 2008

一分子 SO₂ 的吸收是一分子臭氧的四倍,因此在计算臭氧柱总量时要考虑 SO₂ 的影响(赵军等, 2012)。SO₂ 在大气中的含量很少,柱浓度小于臭氧柱浓度的 0.1%,SO₂ 主要集中在边界层,研究表明

(Krueger, 1983; Mcpeters et al, 2013), 边界层的 SO_2 对于利用紫外辐射的后向散射反演臭氧没有显著的影响, 而火山喷发进入平流层的 SO_2 则会给臭氧反演带来较大的误差。中国地区近年来没有火山喷发, 但是鉴于 SO_2 在紫外波段的吸收特性, 需要进一步分析中国地区平流层 SO_2 对臭氧反演的影响。

OMI 两种反演算法对 SO_2 的订正方法不同, OMI-TOMS 采用 305~310 nm 的多对波长进行订正, OMI-DOAS 则利用 OMI 高光谱特性在波长匹配时减小 SO_2 的影响。中国地区平流层 SO_2 的含量对两种算法各自的反演结果以及两者的差没有显著影响, 也没有随季节变化的特征。OMI 探测的光谱可以反演获得平流层 SO_2 , 图 9 是 2009 年 9 月中国地区两种算法臭氧柱浓度差和 OMI 反演的平流层 SO_2 的散点密度图。由图可见, 两种算法的差不随平流层 SO_2 变化, 其他时间范围两种臭氧产品、两种产品的差与平流层 SO_2 的分布图都具有类似图 9 的特征。

2.2.4 吸收性气溶胶

气溶胶的存在会对辐射在大气中的传输产生影响, 而且不同类型的气溶胶产生的消光效应也不同, 紫外吸收气溶胶会使算法高估臭氧柱总量。OMI-TOMS 算法利用 331 和 360 nm 的后向散射辐射计算紫外气溶胶指数 (aerosol index, AI)。理论上, AI

为正值时表明大气中有吸收紫外辐射的气溶胶, 如沙尘、烟尘等, AI 在 0 附近表明大气被云覆盖, AI 为负值时表明大气中有散射性的气溶胶。利用 360 nm 波长计算的吸收性气溶胶指数与吸收性气溶胶的光学厚度有很好的比例关系, 因此, 可以用其来反映大气中吸收性气溶胶的含量。因为 AI 会因地表反照率 (水面反射) 随波长的改变而产生偏差, 只有大于 +1 的值是准确的。AI 在不同波段计算的结果是不同的, 在 TOMS 算法选择的波段, 吸收性气溶胶的有效值通常在 0~5 (赵富强等, 2017)。本文结合 OMI-TOMS 反演的 AI, 分别研究了吸收性气溶胶对于两种产品及两产品差的影响, 散点密度图的分布与图 9 相似, 即吸收性气溶胶对于两种算法及两者间的差异没有显著影响。

3 结 论

(1) OMI-TOMS、OMI-DOAS 算法在中国区域反演结果的相关性很高, 且两者都具有季节性变化, 冬季相关性高, 夏季的相关性则相对较低。

(2) 通过分析两种算法长时间序列的反演结果, 发现中国地区臭氧柱浓度具有季节性变化的特征, 冬季出现全年最高值, 夏季出现全年最低值。两种产品的标准差数值及变化趋势相近, 说明两种算法对于不同大气状态的响应具有一致性。

(3) OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 算法由于受 OMI 仪器行异常现象的影响, 在某些像元上臭氧值会出现较大的浮动; 而没有受此影响的像元反演的臭氧柱浓度十分接近, 反演结果与像元位置无关。

(4) 两种反演算法计算的臭氧柱浓度差异在中国地区的地理分布具有季节性变化的特点。

(5) 云的存在会增大两种算法的差异, 少云 (云量小于 30%) 和多云 (云量大于 70%) 时, 两种算法的差异与云量没有显著关系, 当云量在 30%~70% 时, 随着云量的增加, 两者差异增大, 云量 70% 时达到最大。

(6) 中国地区 OMI-TOMS、OMI-DOAS 算法的差异与太阳天顶角没有明显的依赖关系, 但是在 $35^\circ\sim 40^\circ$ 这一区间内臭氧柱浓度差偏大, 可能是由于 DOAS 算法中 AMF 计算不准确而带来的误差。当有云存在时, 两者的差随太阳天顶角的增大而增

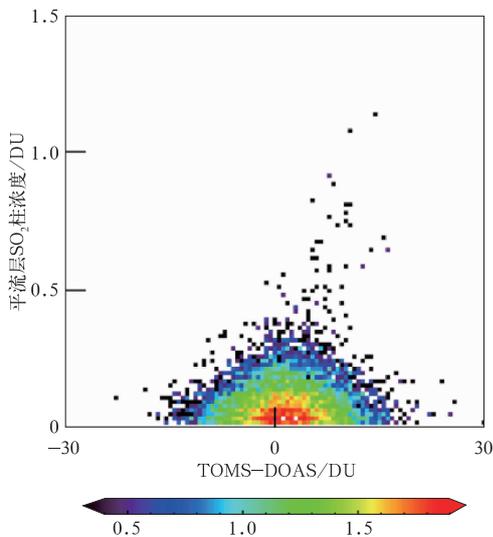


图 9 同图 7, 但为 2009 年 9 月平流层 SO_2 柱浓度

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for SO_2 in stratosphere in September 2009

大。

(7) 平流层 SO₂、吸收性气溶胶的存在对两种算法没有明显影响。

(8) 通过分析两种算法的差异以及造成差异的原因,可以为两种算法产品后续的使用提供一定的理论参考。

参考文献

- 管成功,卞建春,2007. V7版和V8版TOMS大气臭氧资料比较分析[J]. 气象科技,35(3):387-392. Guan C G, Bian J C, 2007. Comparison between two different versions of TOMS total ozone column datasets[J]. Meteor Sci Technol, 35(3):387-392(in Chinese).
- 江芳,2007. 紫外散射反演臭氧总量的若干问题研究[D]. 北京:中国科学院空间科学与应用研究中心. Jiang F, 2007. Study on certain problems of total ozone inversion by ultraviolet scattering [D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences(in Chinese).
- 卢乃锰,方翔,刘健,等,2017. 气象卫星的云观测[J]. 气象,43(3):257-267. Lu N M, Fang X, Liu J, et al, 2017. Cloud observation by meteorological satellite[J]. Meteor Mon, 43(3):257-267(in Chinese).
- 施春华,陈月娟,郑彬,等,2010. 平流层臭氧季节变化的动力和光化学作用之比较[J]. 大气科学,34(2):399-406. Shi C H, Chen Y J, Zheng B, et al, 2010. A comparison with the contribution of dynamics and chemistry in ozone's seasonal variation in the stratosphere[J]. Chin J Atmos Sci, 34(2):399-406(in Chinese).
- 肖辉,朱彬,黄美元,等,1999. 云对云中大气臭氧影响因子的分析[J]. 气候与环境研究,4(3):259-266. Xiao H, Zhu B, Huang M Y, et al, 1999. Numerical study of the impact of clouds on atmospheric ozone[J]. Clim Environ Res, 4(3):259-266(in Chinese).
- 徐国强,朱乾根,李晓燕,2004. 南北极区和青藏高原臭氧变化与中国降水和温度的联系[J]. 气象,30(1):8-12. Xu G Q, Zhu Q G, Li X Y, 2004. Relationships between ozone variation over polar and Tibetan Plateau Areas and variation of precipitation and temperature in China[J]. Meteor Mon, 30(1):8-12(in Chinese).
- 张兴赢,张鹏,方宗义,等,2007. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展[J]. 气象,33(7):3-14. Zhang X Y, Zhang P, Fang Z Y, et al, 2007. The progress in trace gas remote sensing study based on the satellite monitoring[J]. Meteor Mon, 33(7):3-14(in Chinese).
- 赵富强,王维和,邓小波,等,2017. 大气臭氧总量与吸收性气溶胶指数的关系[J]. 遥感学报,21(4):500-508. Zhao F Q, Wang W H, Deng X B, et al, 2017. Relationship between total atmospheric ozone and absorptive aerosol index[J]. J Remote Sens, 21(4):500-508(in Chinese).
- 赵军,樊洁平,张斌才,等,2012. 大气 SO₂ 卫星遥感监测技术及其研究进展[J]. 安全与环境学报,12(4):166-169. Zhao J, Fan J P, Zhang B C, et al, 2012. Atmospheric SO₂ satellite remote sensing monitoring technology and its research progress[J]. J Safety Environ, 12(4):166-169(in Chinese).
- 郑向东,2008. 云对中国区域卫星观测臭氧总量精度影响的检验分析[J]. 大气科学,32(6):1431-1444. Zheng X D, 2008. Investigation on effect of cloud on the precision of total ozone from satellite measurements over China regions[J]. Chin J Atmos Sci, 32(6):1431-1444(in Chinese).
- 周秀骥,李维亮,陈隆勋,等,2004. 青藏高原地区大气臭氧变化的研究[J]. 气象学报,62(5):513-527. Zhou X J, Li W L, Chen L X, et al, 2004. Study on ozone change in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Meteor Sin, 62(5):513-527(in Chinese).
- Antón M, Cancillo M L, Serrano A, et al, 2007. Ozone mini-hole over southwestern Spain during January 2004; influence over ultra-violet radiation[J]. Geophys Res Lett, 34(10):473-476.
- Antón M, López M, Vilaplana J M, et al, 2009. Validation of OMI-TOMS and OMI-DOAS total ozone column using five Brewer spectroradiometers at the Iberian Peninsula[J]. J Geophys Res, 114(D14):D14307.
- Balis D, Kroon M, Koukouli M E, et al, 2007. Validation of ozone monitoring instrument total ozone column measurements using brewer and dobson spectrophotometer ground-based observations[J]. J Geophys Res, 112(D24):D24S46.
- Bhartia P K, Wellemeyer C, 2002. TOMS-V8 total O₃ algorithm[M] // Bhartia P K. OMI Algorithm Theoretical Basis Document. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 2:15-31.
- Buchard V, Brogniez C, Auriol F, et al, 2008. Comparison of OMI ozone and UV irradiance data with ground-based measurements at two French sites[J]. Atmos Chem Phys, 8(16):4517-4528.
- Huang G, Liu X, Chance K, et al, 2017. Validation of 10-year SAO OMI Ozone Profile (PROFOZ) product using ozonesonde observations[J]. Atmos Meas Tech, 10(7):1-47.
- Livingston J M, Redemann J, Russell P B, et al, 2009. Comparison of aerosol optical depths from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) on Aura with results from airborne sunphotometry, other space and ground measurements during MILAGRO/INTEX-B[J]. Atmos Chem Phys, 9(2):537-540.
- Koch G, Wernli H, Schwierz C, et al, 2005. A composite study on the structure and formation of ozone miniholes and minihighs over central Europe[J]. Geophys Res Lett, 32(12):273-280.
- Kroon M, Veeckind J P, Sneep M, et al, 2008. Comparing OMI-TOMS and OMI-DOAS total ozone column data[J]. J Geophys Res, 113(D16):D16S28.
- Krueger A J, 1983. Sighting of El Chichón sulfur dioxide clouds with the Nimbus 7 total ozone mapping spectrometer[J]. Science, 220(4604):1377-1379.
- Ma M L, Shi R H, Gao W, 2015. Validation of the OMI-TOMS and

- OMI-DOAS total ozone column data using ground-based observations over China[C]//Proceedings of the SPIE Volume 9610, Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XII. San Diego, California, United States.
- Mepeters R D, Heath D F, Schlesinger B M, 2013. Satellite observation of SO₂ from El Chichon: identification and measurement [J]. *Geophys Res Lett*, 11(12):1203-1206.
- Nikulin G, Karpechko J L, 2005. The mean meridional circulation and midlatitude ozone buildup[J]. *Atmos Chem Phys*, 5(11):3159-3172.
- Peng X, Shen H, Zhang L, et al, 2016. Spatially continuous mapping of daily global ozone distribution (2004–2014) with the Aura OMI sensor [J]. *J Geophys Res*, 121(21). DOI: 10.1002/2016JD025013.
- Salby M L, Callaghan P F, 1993. Fluctuations of total ozone and their relationship to stratospheric air motions[J]. *J Geophys Res*, 98(D2):2715-2727.
- Veefkind J P, de Haan J F, Brinksma E J, et al, 2006. Total ozone from the ozone monitoring instrument (OMI) using the DOAS technique[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 44(5):1239-1244.
- Vries J, Oord G, Hilsenrath E, et al, 2002. Ozone monitoring instrument (OMI)[J]. *Proc Spie*, 44(5):315-325.
- Wohltmann I, Rex M, Brunner D, et al, 2005. Integrated equivalent latitude as a proxy for dynamical changes in ozone column[J]. *Geophys Res Lett*, 32(9):L09811.
- Yan H, Chen L, Tao J, et al, 2012. Corrections for OMI SO₂ BRD retrievals influenced by row anomalies[J]. *Atmos Meas Tech*, 5(11):2635-2646.